

полки, равной ширине простенка. Средние стойки имеют квадратное сечение.

Жесткости стоек определяются согласно рекомендациям, принятым для каменных и армокаменных конструкций [3, 4].

Расчетные усилия в различных характерных сечениях стоек определяются по общим правилам строительной механики.

Для выполнения требований противопожарных норм все открытые поверхности металлоконструкций (балки, обоймы столбов) оштукатуриваются по сетке и частично окрашиваются огнезащитными красками.

Экономический анализ свидетельствует, что общая стоимость коробки здания при предлагаемом варианте каркаса (включая стоимость материалов и технологических затрат) ниже стоимости при применении типового железобетонного каркаса на 40%.

1. Серия 1.420-12. Справочник проектировщика. Типовые железобетонные конструкции зданий и сооружений для промышленного строительства / Под ред. Г.И. Бердичевского. – М.: Стройиздат, 1981. – 488 с.

2. Балка сварная двутавровая. ТУ У 01412851.001-95.

3. СНиП II-22-81. Каменные и армокаменные конструкции. – М.: Стройиздат, 1983.

4. Вахнейко П.Ф. Каменные и армокаменные конструкции. – К.: Будівельник, 1978. – 148 с.

Получено 31.10.2005

УДК 539.3

А.А. ЧУПРЫНИН, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

В настоящее время в строительстве широко используются элементы конструкций, расчетная схема которых соответствует тонким оболочкам. Условия эксплуатации при этом характеризуются внешними воздействиями, которые часто приводят к тому, что материал начинает работать за пределами упругости. Учет нелинейных факторов позволяет более адекватно смоделировать процессы деформирования конструкций.

Стремление к уменьшению массы и увеличению несущей способности конструкций привело к тому, что их элементы подвергаются интенсивному воздействию внешних нагрузок, в результате чего в конструкциях возникают большие перемещения и деформации и зависимости между их компонентами связаны нелинейными зависимостями. Кроме того, при высоких температурах и напряжениях в материале наблюдается накопление деформаций ползучести и деградация его структуры (повреждаемость) [1]. Для некоторых конструкционных

материалов, например, алюминий и пластик, которые широко используются в строительстве, процесс ползучести может возникать и при комнатных температурах. На основании анализа состояния проблемы [2] можно отметить, что при наличии методов расчета на ползучесть, в литературе практически отсутствуют методы расчета на ползучесть и разрушение тонких неосесимметричных оболочек на основе метода конечных элементов.

Большинство строительных конструкций при появлении деформаций ползучести способны выполнять свои функции длительное время. Использование современных методов моделирования и расчета элементов конструкций позволит избежать неоправданного повышения материалоемкости.

Обеспечение высокой надежности и долговечности элементов конструкций, при одновременном уменьшении времени проектирования, требует создания соответствующих методов расчета. При этом использование современной компьютерной техники позволяет находить оптимальные конструктивные решения. Нелинейные задачи деформирования тонких оболочек принадлежат к числу наиболее сложных в современной механике. Статья посвящена постановке и методу решения геометрически и физически нелинейных задач ползучести тонких оболочек вращения. Для описания ползучести используется конический оболочечный элемент [3], с уточненными геометрическими зависимостями, за счет нелинейных составляющих деформаций в срединной поверхности оболочки [4].

Как принято в методе конечных элементов, для используемого элемента получено основное вариационное равенство, эквивалентное статическим уравнениям задачи на произвольном шаге времени:

$$\int_S (b_{ijkl} e_{kl} \delta e_{ij}^m - d_{ijkl} \chi_{kl} \delta \chi_{ij}) dS - \int_S p \delta w dS - \int_S (N_{ij}^T + N_{ij}^C) \delta e_{ij} dS + \int_S (M_{ij}^T + M_{ij}^C) \delta \chi_{ij} dS = 0, \quad (1)$$

где p – нормальное давление; $N_{ij}^T, N_{ij}^C, M_{ij}^T, M_{ij}^C$ – обобщенные силовые факторы, подсчитываемые по известным к рассматриваемому моменту времени температурным деформациям и деформациям ползучести; b_{ijkl}, d_{ijkl} – тензоры упругих свойств оболочки; S – область, занятая элементом в срединной поверхности. Связь между компонентами девиатора напряжений s_{ij} и деформациями ползучести c_{ij} с учетом

параметра, характеризующего поврежденность материала ω , конкретизируем уравнения состояния:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{3B(\sigma_i)^{n-1}s_{ij}}{2(1-\omega)^k}; \quad \dot{\omega} = \frac{D(\sigma_i)^m}{(1-\omega)^l}; \quad \omega(0)=0, \quad \omega(t_*)=1, \quad (2)$$

где B, D, n, k, m, l – материалыные постоянные, определяемые в базовых опытах при ползучести; σ_i – интенсивность напряжений.

Конкретизировав функции форм для конечного элемента, получаем из (1) систему разрешающих уравнений для оболочки:

$$\int_{V_i} [\bar{B}^i]^T [D^i] [\bar{B}^i] dV_i \{\delta^i\} = \{F^i\}; \quad F^i = \int_{S_i} [N^i]^T p^i ds_i - \int_{V_i} [\bar{B}^i]^T \sigma_0 dV_i. \quad (3)$$

Здесь δ – вектор узловых перемещений; F – вектор узловых сил; $[N^i]$, $[\bar{B}^i]$, $[D^i]$ – матрицы форм, деформаций и упругих констант; σ_0 – вектор дополнительных напряжений, вызванных деформациями ползучести и температурного расширения. Система уравнений (3) является нелинейной, так как матрицы $[\bar{B}^i]$ сохраняют нелинейные составляющие деформаций. Для линеаризации на каждом шаге по времени, проводится преобразование элементов. В этом случае матрицы связи деформаций и узловых перемещений представляются в виде суммы двух – $[B^i]$ и $[B_n^i]$, соответствующих линейным и нелинейным слагаемым в геометрических соотношениях:

$$\int_{V_i} [B^i]^T [D^i] [B^i] dV_i \{\delta^i\} = \{F^i\} - \{F_n^i\};$$

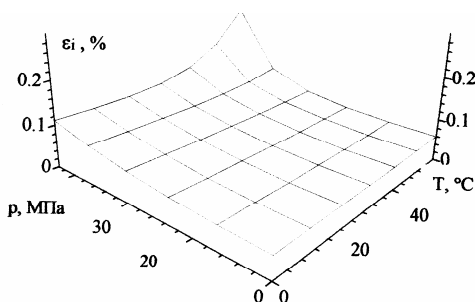
$$\{F_n^i\} = \int_{V_i} ([B_n^i]^T [D^i] [B^i] + [B^i]^T [D^i] [B_n^i] + [B^i]^T [D^i] [B_n^i]) dV_i. \quad (4)$$

Второе слагаемое в правой части системы (4) будем рассматривать как дополнительные узловые силы, определенные из решения на предшествующем шаге времени. Таким образом, на каждом шаге разрешается глобальная система уравнений с постоянными матрицами жесткости.

Предложенный метод расчета реализован в виде пакета прикладных программ. В качестве примера рассмотрим ползучесть открытых

цилиндрических оболочек, деформирующихся под действием внутреннего давления p . Оболочки изготовлены из алюминия и равномерно нагреты до температуры T , а их края закреплены шарнирно и подвижны в плане (геометрические размеры оболочки: длина 10 м, радиус 20 м, угол раскрытия 180° , толщина 0,002 м). Данные исследований для различных значений внутреннего давления и температуры окружающей среды представлены графически в виде зависимости максимальной интенсивности деформаций от величины через 20 лет после начала эксплуатации (рисунок).

Проведенные численные исследования показывают, что вследствие ползучести интенсивность напряжений в оболочечной конструкции существенно перераспределилась. В процессе эксплуатации заметно возросли прогибы и деформации.



Максимальное значение интенсивности деформаций через 20 лет

Анализ приведенных результатов позволяет установить, что на рост деформаций во время эксплуатации существенно влияют оба фактора, кроме того, при $p > 25$ МПа и $T > 40$ °С имеет место существенная интенсификация процесса накопления необратимых деформаций ползучести.

- 1.Малинин Н.Н. Расчеты на ползучесть элементов машиностроительных конструкций. – М.: Машиностроение, 1981. – 221 с.
- 2.Altenbach H., Morachkovsky O., Naymenko K., Sychov A. Geometrically nonlinear bending of thin-walled shells and plates under creep-damage conditions // In: Archive of Applied Mechanics. – 1997. – P.339-352.
- 3.Усюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. – М.: Машиностроение, 1988. – 292 с.
- 4.Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. – М.: Наука, 1976. – 416 с.

Получено 27.10.2005